

PERILAKU LINK PANJANG DENGAN PENGAKU DIAGONAL BADAN PADA SISTEM STRUKTUR RANGKA BAJA TAHAN GEMPA

Bambang Budiono¹⁾, Yurisman²⁾, Nidiasari³⁾

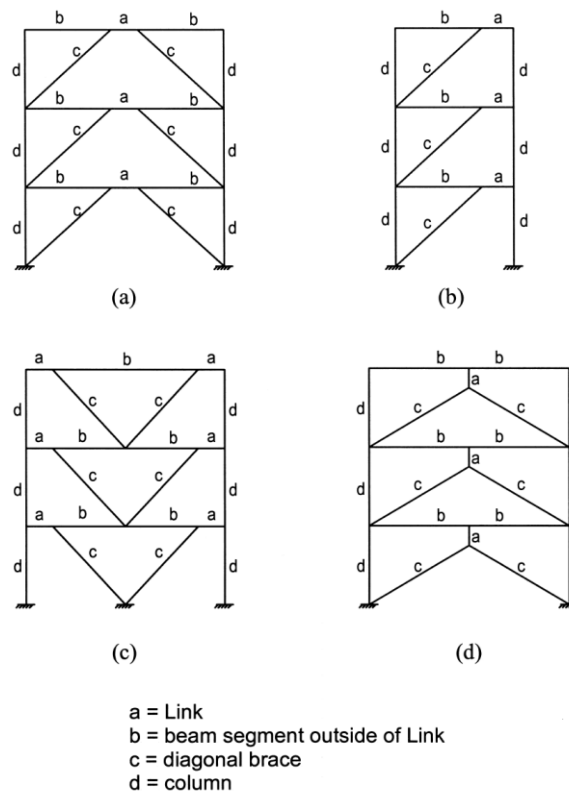
1. Pendahuluan

Rangka baja berpenopang eksentrik (*eccentrically braced frame/EBF*) merupakan suatu sistem struktur rangka baja tahan gempa yang mempunyai kekakuan elastik yang sangat baik (*excellent elastic stiffness*) dibawah pembebanan lateral sedang dan mempunyai daktilitas yang bagus (*good ductility*) dibawah beban gempa besar. Elemen yang sangat penting dalam desain EBF adalah bagian yang terletak antara joint pengaku diagonal dengan joint kolom-balok yang disebut dengan elemen link. Element link merupakan elemen yang diharapkan sebagai elemen yang menyerap energi gempa dan mengalami proses plastifikasi pada bagian elemen yang rusak tersebut sebagai sarana pemencaran energi.

Penelitian tentang link yang banyak dilakukan sampai saat ini baik secara eksperimental maupun analitis didominasi oleh link geser. Hal ini disebabkan karena link geser memperlihatkan perilaku yang baik dalam hal kekakuan, kekuatan dan energi disipasi. Sehingga dalam desain lebih direkomendasikan penggunaan link geser pada *Eccentrically Braced Frames* (EBF). Namun deformasi pada link pendek ditandai dengan sudut deformasi yang besar yang erat kaitannya dengan *drift* yang terjadi pada struktur dan berpotensi menyebabkan kerusakan terhadap elemen-elemen non-struktural. Pada sisi lain, link panjang terbukti mempunyai sudut deformasi yang lebih kecil dari link pendek, tetapi mempunyai tingkat daktilitas yang lebih rendah.

2. Struktur Rangka Baja Eksentrik (*Eccentrically Braced Frames, EBF*)

Eccentrically Braced Frames (EBF) merupakan konsep desain gabungan antara konsep daktilitas dan disipasi energi yang baik dari desain *Moment-Resisting Frames* (MRF) dengan karakteristik kekakuan elastik yang tinggi dari desain *Concentrically Braced Frames* (CBF). Karakteristik yang membedakan EBF dengan desain struktur tahan gempa MRF dan CBF adalah adanya penghubung yang terdapat pada setidaknya salah satu ujung dari *bracing* yang disebut sebagai link (Gambar 1). Konsep desain tahan gempa EBF adalah elemen link ditetapkan sebagai bagian yang akan rusak sedangkan elemen lain diharapkan tetap berada dalam kondisi elastik. Kelehan yang terjadi pada elemen link dapat berupa kelelahan geser atau kelelahan lentur. Tipe kelelahan ini sangat tergantung pada panjang link tersebut. (Engelhardt dan Popov, 1989;1992)

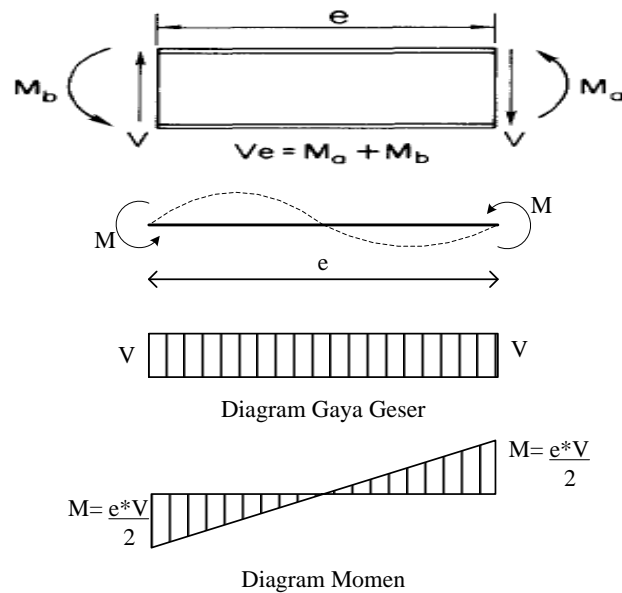


Gambar 1. Konfigurasi link pada beberapa sistem portal (AISC, 2005)

3. Elemen link

Link berperan sebagai *ductile fuse*, mendisipasi energi sepanjang perilaku histerisis yang stabil dan membatasi gaya terhadap *brace*, kolom dan balok diluar link. Link berperilaku sebagai balok pendek dengan gaya geser yang bekerja berlawanan arah pada kedua ujungnya. Karena adanya gaya geser yang bekerja pada kedua ujung balok, maka momen yang dihasilkan pada kedua ujung balok mempunyai besar dan arah yang sama. Deformasi yang dihasilkan berbentuk S dengan titik balik pada tengah bentang dan besarnya momen yang bekerja adalah sebesar 0.5 kali besar gaya geser dikali dengan panjang link. Plastifikasi yang terjadi pada suatu elemen link disebabkan karena kedua gaya tersebut. Gambaran gaya yang bekerja pada elemen link diperlihatkan pada Gambar 2.

Sesuai dengan fungsinya sebagai sekering (*fuse*) yang mendisipasikan energi lewat mekanisme sendi plastik (*fully plastic hinge mechanism*) maka link tidak boleh mengalami tekuk elastik dan tekuk inelastik (*partially plastic buckling*) sebelum kapasitas rotasi sendi plastik yang disyaratkan dalam peraturan tercapai. Oleh karena itu dalam pemilihan penampang link yang akan dipakai sesuai dengan modulus elastisitas (E) dan mutu baja yang dipakai (f_y) telah ditetapkan batasan kelangsingan yang harus dipenuhi sesuai dengan peraturan yang berlaku



Gambar 2. Gaya yang bekerja pada link
(Engelhart dan Popov, 1988 ; Becker dan M. Isler, 1996)

Panjang link yang disyaratkan (e_{all}) disesuaikan dengan klasifikasi link berdasarkan perbedaan panjang berdasarkan AISC, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Mekanisme kelelahan link, kapasitas energi disipasi dan mode kegagalan sangat erat hubungannya dengan faktor panjang dari link. Untuk link pendek, perilaku inelastik dominan terhadap gaya geser, sebaliknya untuk link panjang perilaku inelastik didominasi oleh lentur. Untuk link antara (*intermediate link*), kelelahan dipengaruhi oleh geser dan lentur.

Semakin pendek link, maka semakin besar pengaruh gaya geser terhadap perilaku inelastik. Kelelahan geser terjadi seragam sepanjang link. Untuk link yang sangat pendek gaya geser link mencapai kapasitas geser plastis $V_p = 0.6.d.tw.F_y$, sebelum momen ujung mencapai momen plastis $M_p = Z_x.F_y$, dan link leleh akibat geser membentuk sebuah sendi geser. Link geser mempunyai sifat sangat daktile dengan kapasitas inelastik yang melebihi kapasitas geser badan, sehingga kegagalan *buckling* terjadi pada *web*. (Yurisman, 2010)

Untuk link yang lebih panjang, momen ujung mencapai M_p membentuk sendi-sendi lentur sebelum terjadinya kelelahan geser. Mekanisme keruntuhan yang terjadi pada link panjang disebabkan karena deformasi lentur yang menyebabkan terjadinya kegagalan yang merupakan kombinasi dari terjadinya *buckling* pada sayap (*flens*), *compression buckling* pada badan (*web*) dan/atau *lateral torsional buckling*. Sebagai tambahan, akibat regangan yang sangat besar pada kedua ujung link maka besar kemungkinan terjadinya fracture pada sambungan las ujung pada saat terjadi mode keruntuhan batas (*the ultimate failure mode*).

Klasifikasi link berdasarkan perbedaan panjang berdasarkan AISC, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* adalah sebagai berikut : (AISC, 2005)

- Link geser murni, $e \leq 1.6 M_p/V_p$
Kelelahan pada link jenis ini didominasi oleh geser.
- Link dominan geser, $1.6 M_p/V_p \leq e \leq 2.6 M_p/V_p$
Kelelahan pada link jenis ini merupakan kombinasi antara geser dan lentur
- Link dominan lentur $2.6 M_p/V_p < e \leq 5 M_p/V_p$
Kelelahan pada link jenis ini merupakan kombinasi antara geser dan lentur
- Link lentur murni $e \geq 5 M_p/V_p$
Kelelahan pada link jenis ini didominasi oleh lentur

4. Hubungan pengaku badan (*web stiffener*) dan sudut rotasi terhadap kinerja link

Pengaku setinggi badan penuh diperlukan pada sisi-sisi ujung link agar bisa mentransfer gaya geser sebaik mungkin tanpa terjadi tekuk badan. Untuk link yang berperilaku sebagai link geser/pendek, jarak maksimum pengaku badan bagian tengah sangat tergantung pada besaran sudut rotasi link, semakin besar sudut rotasi link maka akan semakin rapat pengakunya. Pengaku badan bagian tengah pada link geser ini berfungsi untuk memperlambat terjadinya tekuk geser inelastik pada badan. Sedangkan untuk link yang berperilaku sebagai link lentur/panjang, pengaku badan bagian tengah berfungsi untuk membatasi penurunan kekuatan yang disebabkan tekuk lokal pelat sayap (*flange local buckling*) dan tekuk lateral torsi.

AISC 2005 mendefinisikan sudut rotasi link (*link rotation angle*) adalah sudut inelastik diantara link dan balok diluar link ketika *total drift* (simpangan) tingkat sama dengan simpangan tingkat disain. Sudut rotasi link tidak boleh melebihi nilai-nilai berikut :

- 0,08 radian untuk link yang panjangnya $1,6M_p/V_p$ atau kurang.
- 0,02 radian untuk link yang panjangnya $2,6M_p/V_p$ atau lebih.
- Untuk link yang panjangnya antara $1,6M_p/V_p$ dan $2,6M_p/V_p$ ditentukan dengan cara interpolasi linier.

Tabel 1. Klasifikasi jarak pengaku badan antara (*intermediate stiffener*)

No	Panjang Link	Jenis Link	Rotasi	Jarak Pengaku Maximum
1	$e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p}$	Geser murni	0.08	$30.t_w - d/5$
			< 0.02	$52.t_w - d/5$
2	$1.6 \frac{M_p}{V_p} < e \leq 2.6 \frac{M_p}{V_p}$	Dominan geser		1 dan 3 dipenuhi
3	$2.6 \frac{M_p}{V_p} < e \leq 5 \frac{M_p}{V_p}$	Dominan lentur	0.02	1.5 b_f dari tiap ujung link
4	$e > 5 \frac{M_p}{V_p}$	Lentur murni		Tidak memerlukan pengaku antara

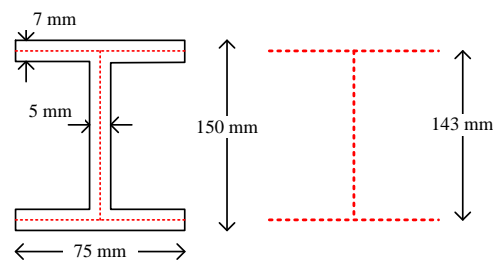
5. Pengaruh Pengaku Diagonal Badan Terhadap Kinerja Link Panjang

5.1 Pemodelan Link

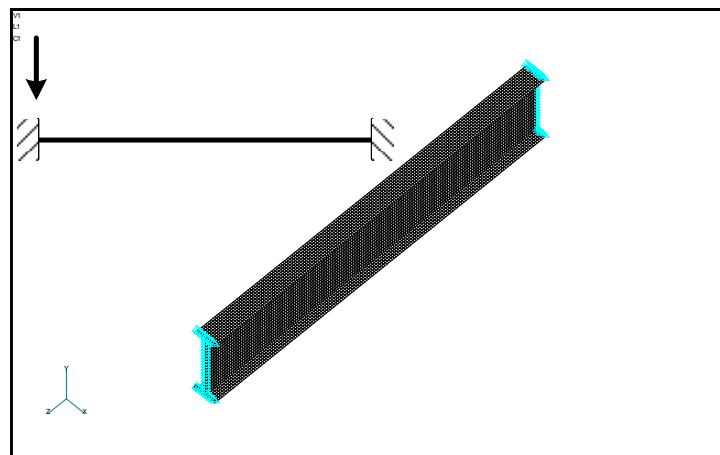
Pada kajian ini elemen link dimodelkan sebagai balok yang dijepit pada kedua ujungnya dan diberi perpindahan transversal pada salah satu ujungnya. Hal ini menyebabkan link pada sisi yang diberi beban transversal memiliki lima derajat kebebasan sedang sisi

lainnya terjepit sempurna dan memiliki enam derajat kebebasan sehingga gaya yang bekerja seperti pada Gambar 2 dapat didekati.

Link dimodelkan sebagai elemen *shell* melalui pendekatan elemen hingga dimana tiap elemen terdiri dari empat *node* dan tiap *node* mempunyai enam derajat kebebasan. Geometri yang digunakan pada model berdasarkan *centerline* dari profil IWF yang digunakan pada pemodelan link. Gambar 3 dan 4 memperlihatkan model geometri dan model *finite element* link yang digunakan dalam penelitian ini.

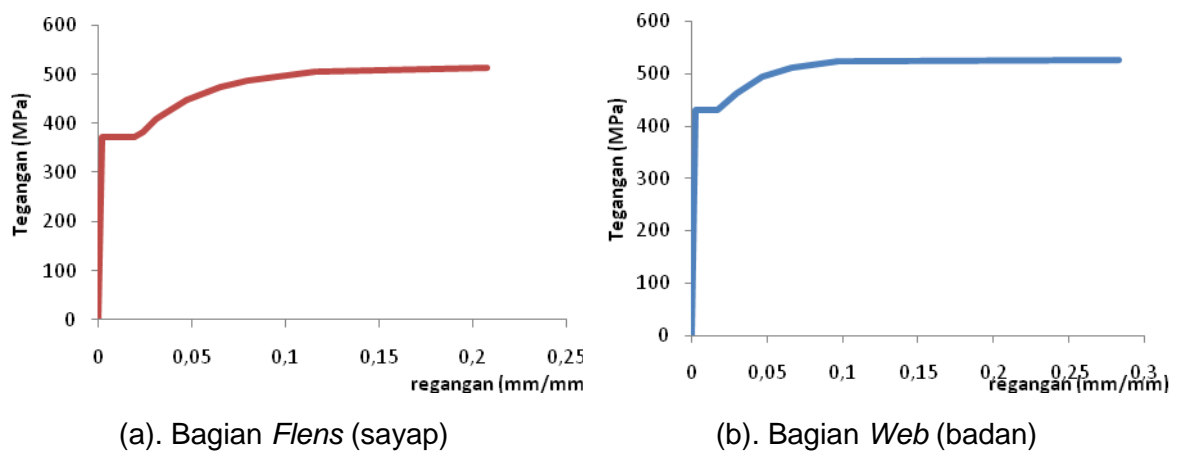


Gambar 3. Pemodelan geometri link



Gambar 4 Pemodelan *finite element* link

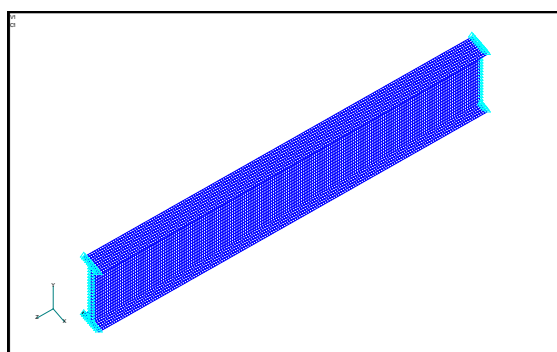
Profil baja yang digunakan sebagai elemen balok adalah adalah WF 150.75.5.7 dengan fungsi material baja yang digunakan adalah fungsi material yang diperoleh berdasarkan pengujian *coupon* di laboratorium. Berdasarkan profil yang digunakan maka panjang elemen link yang dianalisa adalah $e = 1550$ mm dengan tipe link lentur (panjang).



Gambar 5. Fungsi pemodelan kurva tegangan – regangan material

Dengan menggunakan kajian numerik maka akan dilakukan analisis terhadap konfigurasi pengaku untuk mengetahui konfigurasi yang memperlihatkan perilaku link panjang yang paling baik. Berdasarkan studi tersebut maka link panjang dianalisa dengan membandingkan kinerja dan perilaku link pada tiga kondisi yaitu link tanpa pengaku badan (Gambar 6.) , link dengan pengaku vertikal badan (Gambar 7.) serta link dengan pengaku *cross diagonal* (Gambar 8.). Selanjutnya hasil kajian numerik ini diverifikasi dengan hasil pengujian di laboratorium.

Pembebanan yang diberikan terhadap tiga jenis benda uji adalah pembebanan static monotonik (numerik) dan pembebanan siklik (numerik dan eksperimental) dengan kontrol perpindahan. Pembebanan statik monotonik bertujuan untuk melihat respon benda uji dalam menahan beban statik, menentukan leleh pertama, melihat mode keruntuhan yang terjadi pada benda uji serta distribusi tegangan yang terjadi. Sedangkan pembebanan siklik bertujuan untuk mendapatkan kurva *hysteretic* yang dapat menggambarkan kemampuan disipasi energi dari benda uji.

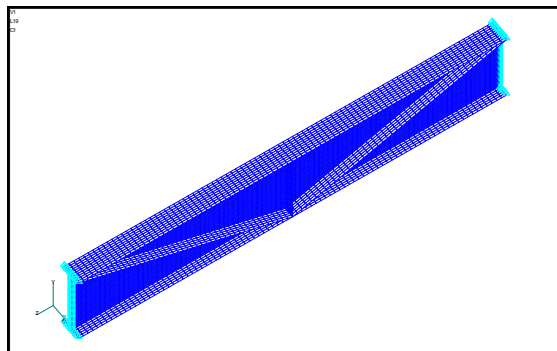


a. Model Numerik



b. Model Eksperimental

Gambar 6. Model elemen link tanpa pengaku badan.

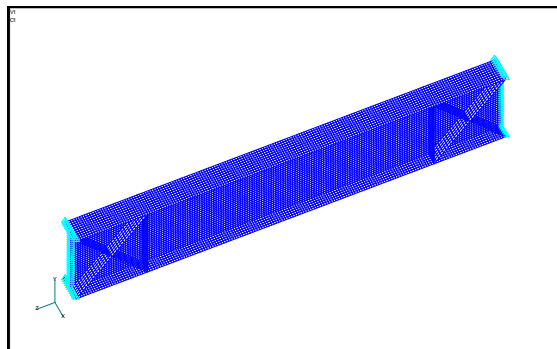


a. Model Numerik



b. Model Eksperimental

Gambar 7. Model elemen hingga link dengan pengaku diagonal badan



a. Model Numerik

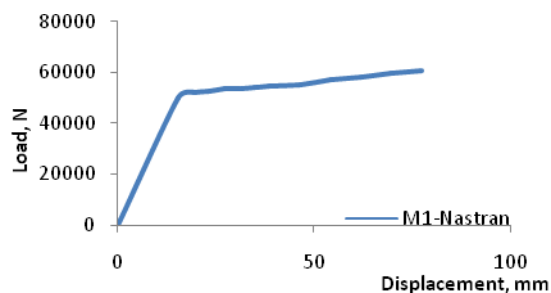


b. Model Eksperimental

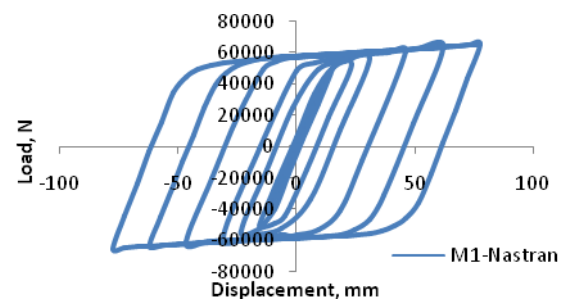
Gambar 8. Model elemen hingga link dengan pengaku cross diagonal badan

5.2 Perilaku link panjang sesuai ketentuan AISC 2005

Kinerja link dapat dilihat melalui kekuatan (*strength*), kekakuan (*stiffness*), dan kemampuan link dalam mendisipasi energi. Besarnya nilai kekuatan dan kekakuan dapat ditinjau dari kurva beban vs perpindahan yang diperoleh dari link panjang dengan pemberian beban statik monotonik. Sedangkan kemampuan link dalam mendisipasi energi dapat diketahui dengan memberikan beban siklik pada elemen link. Pemberian beban disesuaikan dengan besarnya *displacement* yang dicapai oleh benda uji pada saat benda uji mencapai kekuatan maksimum sebelum mengalami keruntuhan.



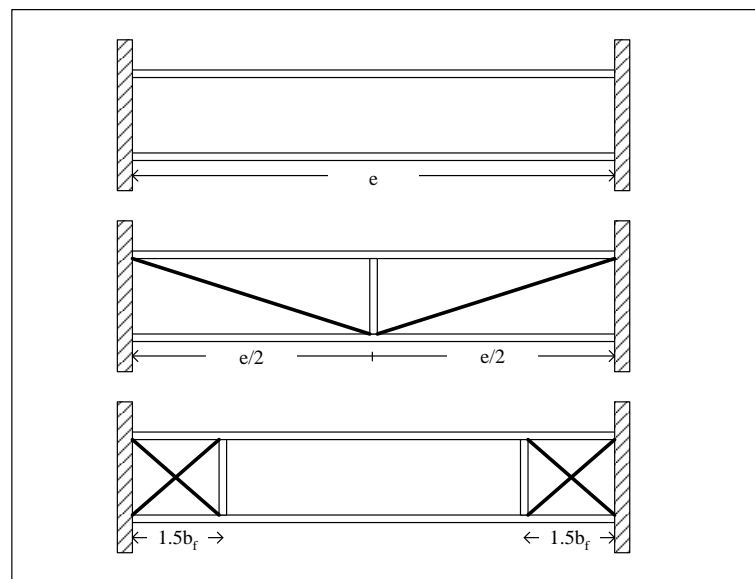
Gambar 10. Kurva beban vs perpindahan terhadap link panjang dengan beban monotonik



Gambar 11. Kurva beban vs perpindahan terhadap link panjang dengan beban siklik.

5.3 Pengaruh pengaku diagonal terhadap perilaku link panjang

Analisa perilaku link panjang dalam studi pendahuluan ini dilakukan terhadap 3 (tiga) jenis benda uji yaitu link panjang tanpa pengaku badan (sesuai ketentuan AISC 2005 untuk link panjang) yang kemudian akan dibandingkan dengan kinerja link dengan pengaku diagonal badan, dan link dengan pengaku cross diagonal pada kedua ujung link dengan jarak $1.5b_f$ (Gambar 12).



Gambar 12. Tiga model benda uji yang digunakan

Sebagai analisa awal dilakukan pengujian secara numerik dengan pemberian beban statik monotonik pada model benda uji. Gambar 13 (a) menunjukkan bahwa dengan pemberian beban statik monotonik dapat meningkatkan kemampuan link dalam menerima beban hingga 16.96% (Tabel 2) terhadap link panjang dengan pemberian pengaku diagonal badan (Model 2) dan pengaku *cross diagonal* (Model 3) jika dibandingkan dengan link panjang tanpa pengaku badan (Model 1). Peningkatan link dalam mendisipasi energi diperlihatkan pada Gambar 13 (b) yang ditandai dengan terjadinya peningkatan kemampuan link dalam menerima beban serta peningkatan kekakuan akibat penambahan pengaku diagonal pada badan link panjang. Selain itu dengan melihat distribusi tegangan yang terjadi selama pembebanan juga dapat ditinjau kondisi link pada saat terjadi kelelahan awal dan kondisi link pada saat menerima beban berupa perpindahan.

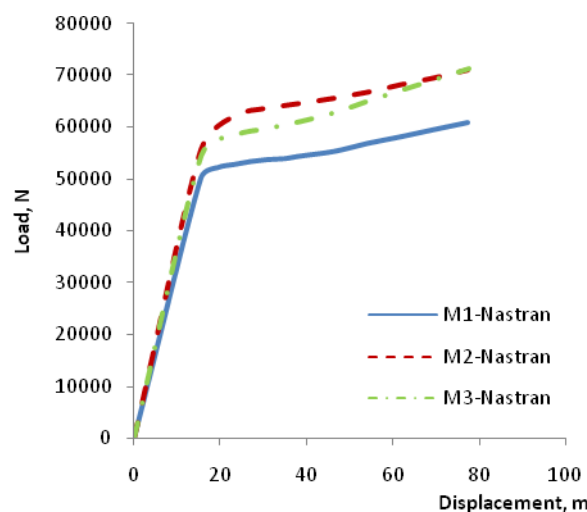
Tabel 2. Peningkatan nilai kekuatan terhadap tiga variasi pengaku diagonal pada link panjang.

Model	Load (N)	% peningkatan
1	60860.1	-
2 (diagonal)	70904.91	16.50%
3 (cross diagonal)	71179.99	16.96%

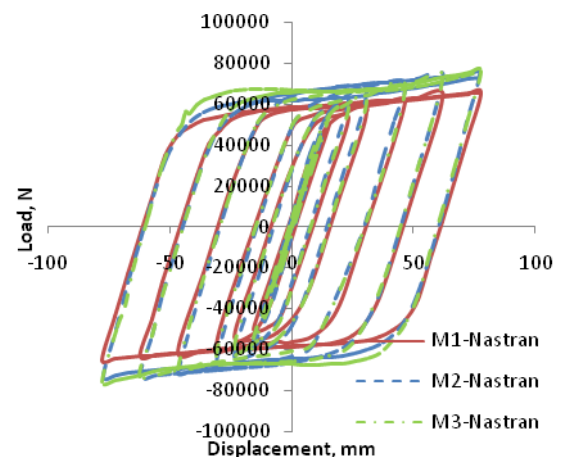
Tabel 3 memperlihatkan bahwa bahwa kelelahan awal terjadi pada saat *displacement* 5.4 mm, namun kemampuan link dalam menerima beban pada saat kelelahan awal bervariasi tergantung pada model link yang dianalisis.

Tabel 3 Perpindahan leleh dan kapasitas beban pada saat leleh pada link dengan beban monotonik.

Model	δ_y , mm	P_y , N
1	15.48	50164.58
2 (diagonal)	15.44	55537.86
3 (cross diagonal)	15.5	54411.63



(a).



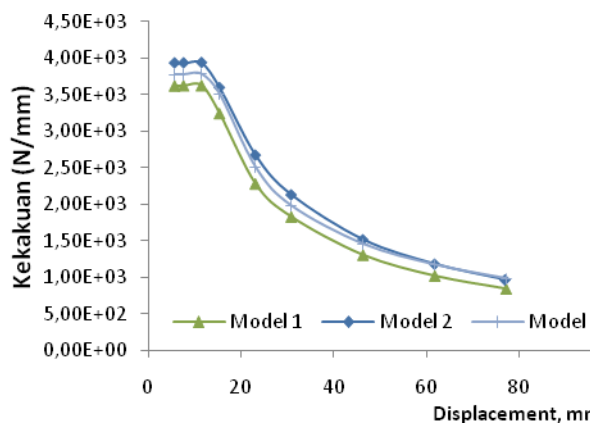
(b).

Gambar 13. Perbandingan konfigurasi link panjang dengan dan tanpa pengaku diagonal badan terhadap beban vs perpindahan akibat (a). beban monotonik dan (b). beban siklik.

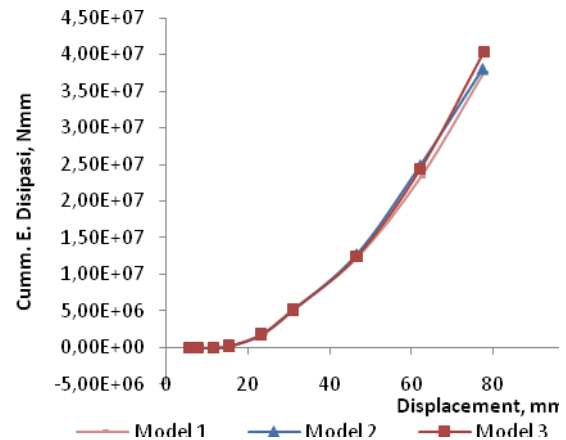
Berdasarkan kurva beban – perpindahan diatas maka diperoleh hasil perbandingan nilai beban maksimum, kekakuan dan enegi disipasi dari setiap model sebagai berikut :

Tabel 4. Beban maksimum tiap siklus pembebanan pada tiga jenis model link

Siklus	Model 1		Model 2		Model 3		Model 1		Model 2		Model 3	
	P_{max} (N)		P_{max} (N)		P_{max} (N)		P_{max} ,normalisasi		P_{max} ,normalisasi		P_{max} ,normalisasi	
	Tarik (+)	Tekan (-)	Tarik (+)	Tekan (-)	Tarik (+)	Tekan (-)	Tarik (+)	Tekan (-)	Tarik (+)	Tekan (-)	Tarik (+)	Tekan (-)
1	2.10E+04	2.10E+04	2.28E+04	2.28E+04	2.20E+04	2.20E+04	1.00	1.00	1.09	1.09	1.05	1.05
2	2.81E+04	2.81E+04	3.05E+04	3.05E+04	2.93E+04	2.93E+04	1.00	1.00	1.09	1.09	1.05	1.05
3	4.21E+04	4.21E+04	4.57E+04	4.57E+04	4.41E+04	4.41E+04	1.00	1.00	1.09	1.09	1.05	1.05
4	5.02E+04	5.03E+04	5.57E+04	5.57E+04	5.44E+04	5.45E+04	1.00	1.00	1.11	1.11	1.08	1.08
5	5.30E+04	5.41E+04	6.21E+04	6.29E+04	5.84E+04	5.85E+04	1.00	1.00	1.17	1.16	1.10	1.08
6	5.68E+04	5.81E+04	6.60E+04	6.70E+04	6.15E+04	6.31E+04	1.00	1.00	1.16	1.15	1.08	1.09
7	6.09E+04	6.12E+04	7.06E+04	7.13E+04	6.79E+04	6.92E+04	1.00	1.00	1.16	1.16	1.11	1.13
8	6.36E+04	6.32E+04	7.34E+04	7.30E+04	7.29E+04	7.31E+04	1.00	1.00	1.15	1.15	1.15	1.16
9	6.55E+04	6.52E+04	7.48E+04	7.33E+04	7.62E+04	7.60E+04	1.00	1.00	1.14	1.12	1.16	1.17



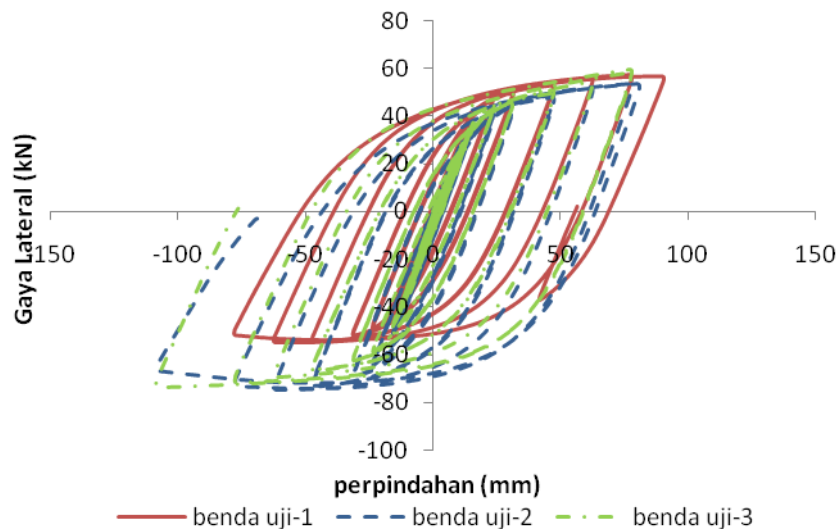
Gambar 14. Perbandingan kekakuan per siklus pada 3 jenis benda uji.



Gambar 15. Perbandingan energi disipasi kumulatif per siklus pada 3 jenis benda uji

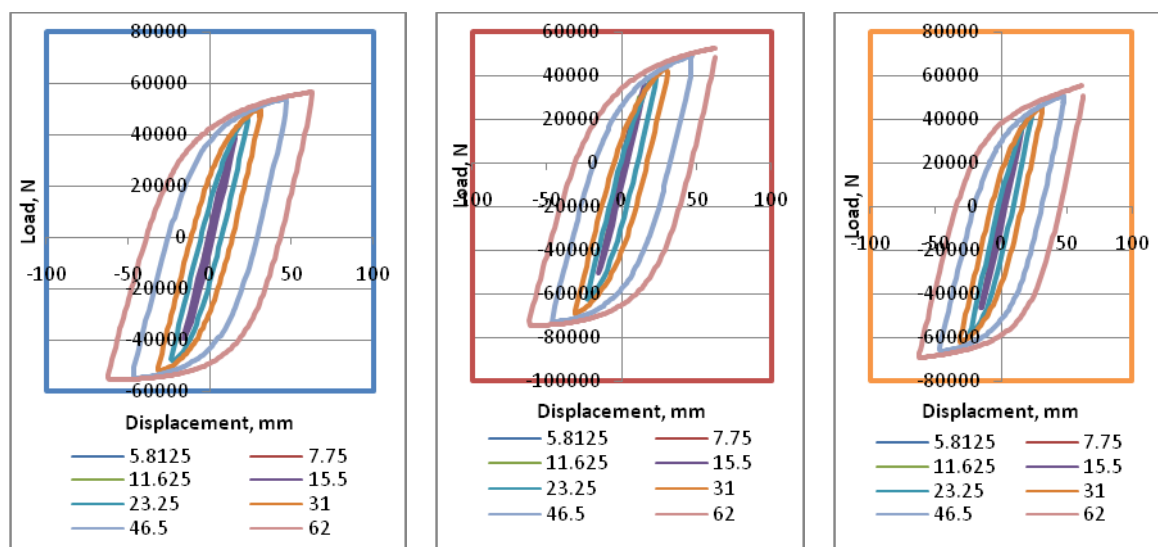
Berdasarkan hasil studi awal yang telah dilakukan secara numerik, ditemukan suatu indikasi bahwa pemasangan pengaku diagonal pada bagian badan elemen link panjang profil WF dapat meningkatkan kemampuan link dalam menahan gaya lateral, kekakuan dan meningkatkan kemampuan link dalam disipasi energi per siklus yang diperoleh dari hasil pembebanan kuasi statik (siklik).

Kajian secara eksperimental selanjutnya dilakukan di laboratorium untuk memverifikasi hasil kajian numerik serta melihat fenomena yang terjadi selama pengujian yang tidak dapat diketahui melalui kajian numerik. Perbandingan hasil pengujian ketiga benda uji dengan pembebanan siklik diperlihatkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Perbandingan konfigurasi link panjang dengan dan tanpa pengaku diagonal badan terhadap beban vs perpindahan akibat beban siklik.

Dari pengujian dapat diketahui nilai displacement maksimum pada masing – masing benda uji pada kondisi tekan dan tarik. Displacement maksimum dapat dicapai oleh benda uji 3 yaitu benda uji dengan pengaku cross diagonal. Pada model 3 ini benda uji masih mampu menahan perpindahan hingga diatas 90 mm tanpa mengalami keruntuhan, namun karena keterbatasan alat di laboratorium maka pengujian tidak dapat dilanjutkan hingga benda uji mengalami keruntuhan seperti pada model 1 dan 2.



Model 1 (NS)

Model 2 (DM)

Model 3 (CDM)

Gambar 16. Energi disipasi tiap siklus pada 3 model benda uji eksperimental.

Dari hasil perhitungan energi disipasi hingga siklus 8 diketahui bahwa model 2 merupakan model eksperimen yang menghasilkan energi disipasi yang paling tinggi dibandingkan 2 model lainnya. Namun hal ini masih belum merupakan kesimpulan akhir karena tidak

memperhitungkan kemampuan link panjang pada model 3 yang masih belum mengalami keruntuhan.

6. Penutup

Makalah yang kami sajikan ini adalah hasil studi awal dan belum mempunyai suatu kesimpulan yang valid. Studi secara eksperimental telah dilakukan di laboratorium Mekanika Struktur PAU-ITB. Dan kami sangat mengharapkan masukan-masukan dari teman-teman Peneliti, Praktisi dan Mahasiswa untuk kesempurnaan penelitian ini.

7. Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada program I-mhere ITB atas Hibah Penelitian Kontribusi Hasil Riset pada Mata Kuliah Terkait Infrastruktur Tahan Gempa Tahun Anggaran 2010 (Nomor Kontrak : 038/KO1.1/I-MHERE ITB/SPK/2010) yang telah membiayai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Yurisman. (2010), *Perilaku Link dengan Pengaku Diagonal Badan pada Sistem Struktur Rangka Baja Berpenopang Eksentrik (EBF)*, Disertasi Doktoral Teknik Sipil, Pengutamaan Rekayasa Struktur, ITB.
2. Nidiasari. (2010), *Kajian Numerik Perilaku Link Panjang dengan Pengaku Diagonal Badan pada Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentris*, Tesis Magister Teknik Sipil, Pengutamaan Rekayasa Struktur, ITB.
3. Novan, Andre (2008), *Peningkatan Kinerja Link Geser dengan Sambungan Baut Tipe Flush yang Memikul Beban Siklik*, Tesis Magister Teknik Sipil, Pengutamaan Rekayasa Struktur, ITB.
4. Guo-Qiang Li, Jin-Jun Li. (2007). *Advanced Analysis and Design of Steel Frames*. John Wiley & Sons Ltd.
5. AISC (2005), *Specification for Structural Steel Building*, Chicago, American Institute of Steel Construction.
6. Richard P.W, Uang C.M.(2005). *Effect o Flange Width-Thickness Ratio on Eccentrically Braced Frames Link Cyclic Rotation Capacity*, Journal of Structural Engineering, Vol 131, No. 10, Oktober 1.
7. Becker, Roy, Ishler, Michael (1996), *Seismic Design Practice For Eccentrically Braced Frames Based on The 1994 UBC*, Steel Tips Journal.
8. Engelhardt, Michael D., Popov, Egor P.(1992). *Experimental Performance of Long Link in Eccentrically Braced Frames*. Journal of Strctural Engineering. Vol. 118, No. 11, November.
9. Engelhardt, Michael D., Popov, Egor P. (1989) , *Behavior of Long Links in Eccentrically Braced Frames*, Earthquake Engineering Research Center UBC/EERC-89/01, College of Engineering University of California at Barkeley.
10. Engelhardt, Michael D., Popov, Egor P. (1989). *On Design of Eccentrically Braced Frames*, Earthquake Spectra Vol. 5, No. 3.
11. Popov, Egor P., Engelhardt, Michael D. (1988). *Seismic Eccentrically Braced Frames*, Journal Construction Steel Research 10. P.321-354.
12. MSC/NASTRAN, *MSC/NASTRAN Handbook for Non Linear Analysis*, NSI Ref. #171-10, The MacNeal – Schwendler Corporation.